



Presentazione finale PhD

VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Tutor scientifico:

Prof. G. BELINGARDI

Co-tutore:

Prof. D.S. PAOLINO

Candidato:

Carlo BOURSIER NIUTTA

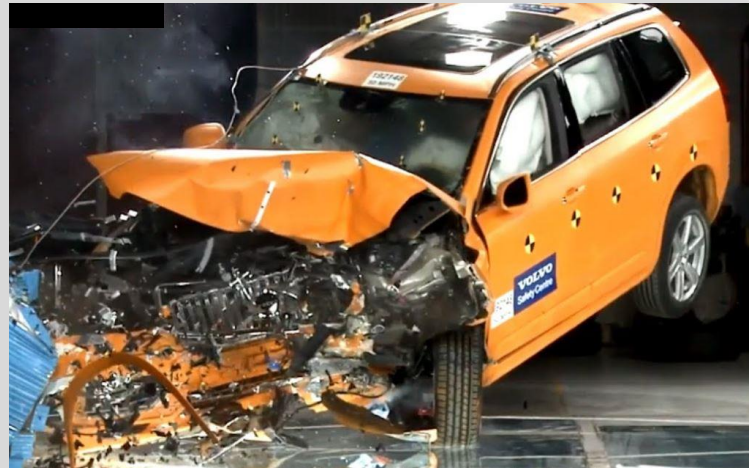


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Variazioni locali delle proprietà elastiche
(difetti, danneggiamenti locali ecc.)



Progettazione \neq Realtà



Strutture in materiale composito:

- Intrinsecamente disomogenei;
- Minore ripetibilità/riproducibilità dei processi produttivi.



Valutazione non distruttiva dello stato di salute

1. Esistenza (del danno)
2. Locazione
3. Tipologia
4. Severità
5. Prognosi

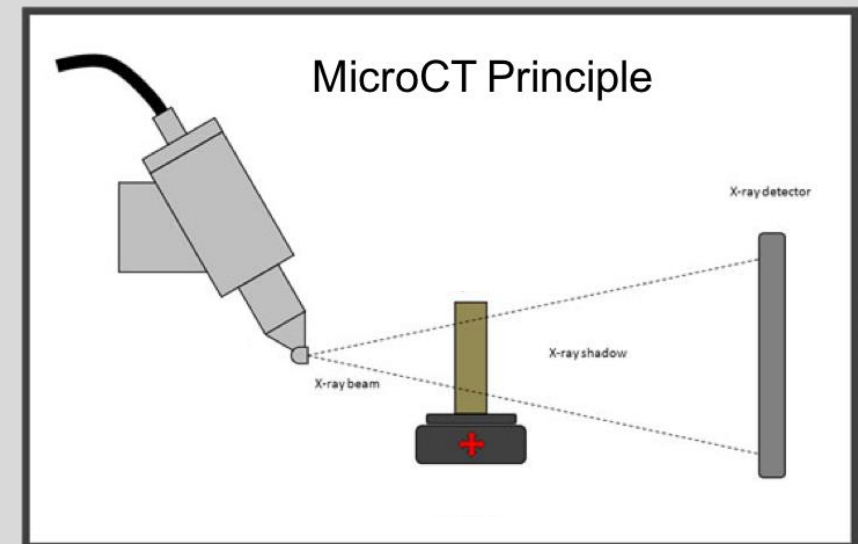


Valutazione non distruttiva dello stato di salute

1. Esistenza (del danno)
2. Locazione
3. Tipologia
4. Severità
5. Prognosi

Metodi di analisi locale:

- Rilevamento anche puntuale di difetti, cricche ecc.
- Valutazione qualitativa ma non quantitativa



C. Garnier, M. L. Pastor, F. Eyma, and B. Lorrain. The detection of aeronautical defects in situ on composite structures using non-destructive testing. *Composite Structures*, 93(5):1328–1336, 2011.

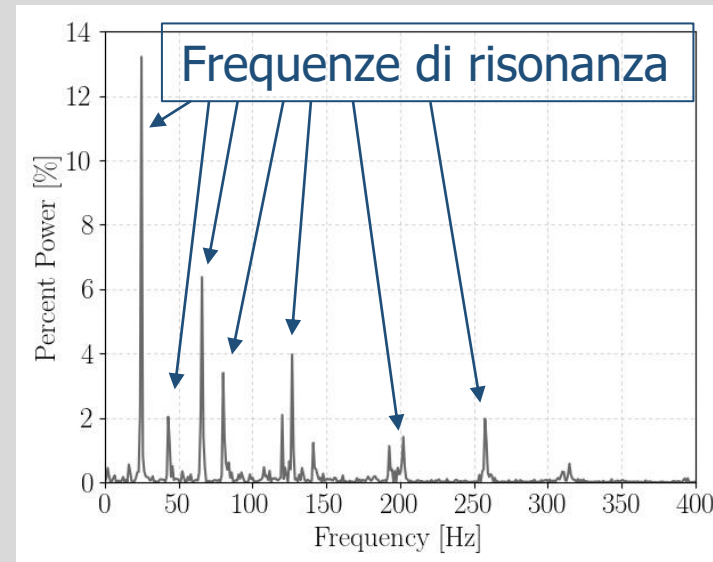


Valutazione non distruttiva dello stato di salute

1. Esistenza (del danno)
2. Locazione
3. Tipologia
4. Severità
5. Prognosi

Metodi di analisi globale:

- Facilità di test, attrezzature economiche, valutazione quantitativa.
- Alta probabilità di non rilevare la presenza del difetto



$$\min_{[E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}]} \sum_i \left(\frac{f_{exp,i} - f_{num,i}}{f_{exp,i}} \right)$$

i: modo

Modello numerico:

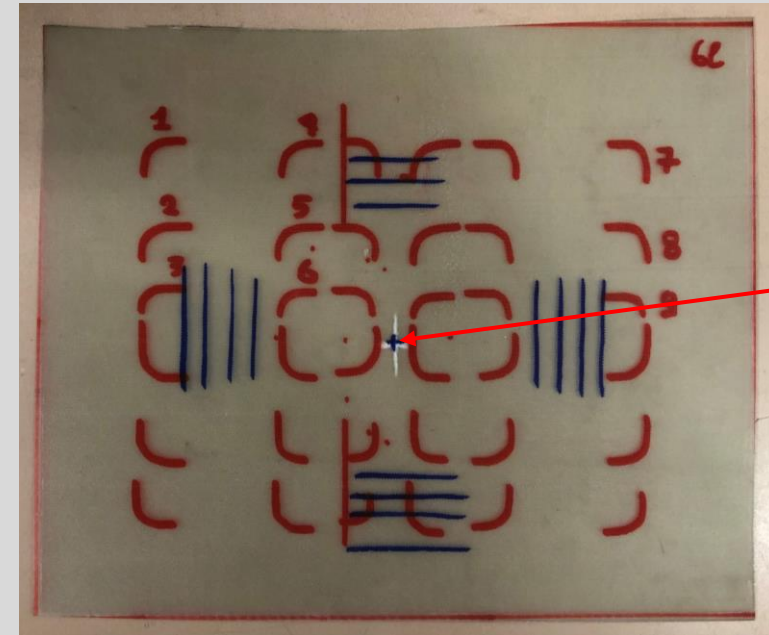
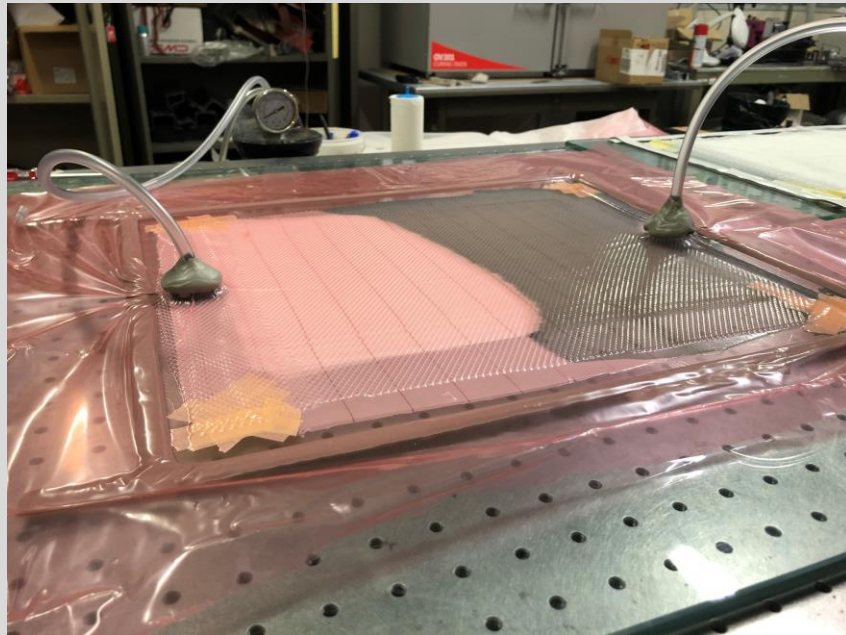
- 1) FEM
- 2) Rayleigh-Ritz
- 3) Soluzione analitica



Valutazione non distruttiva dello stato di salute

Metodi di analisi globale: analisi vibrazionale di una piastra in composito

- Tessuto in fibra di vetro (6 layers) e resina epossidica
- Vacuum bag infusion → curata in forno a 100°C per 3h



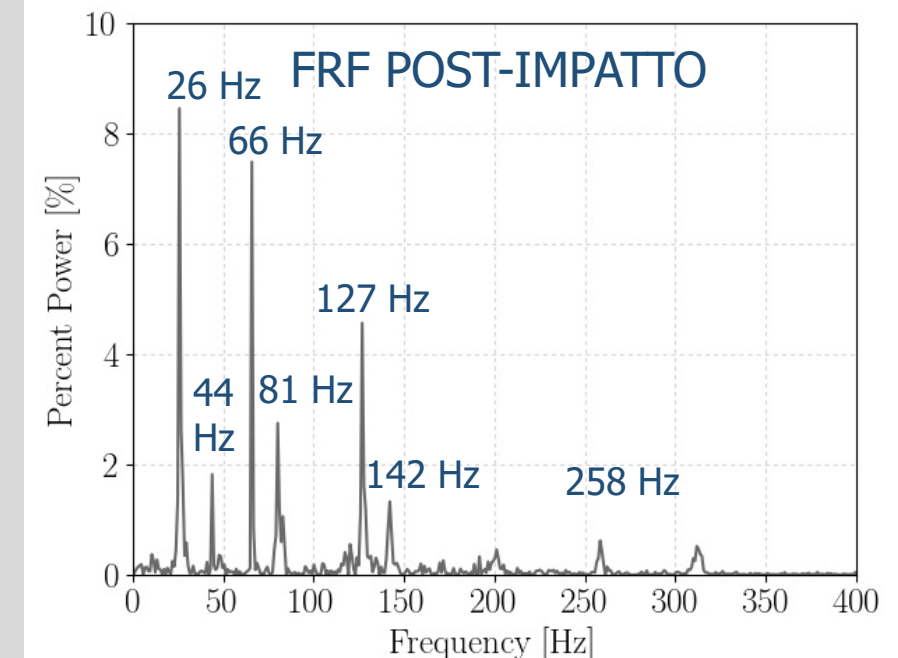
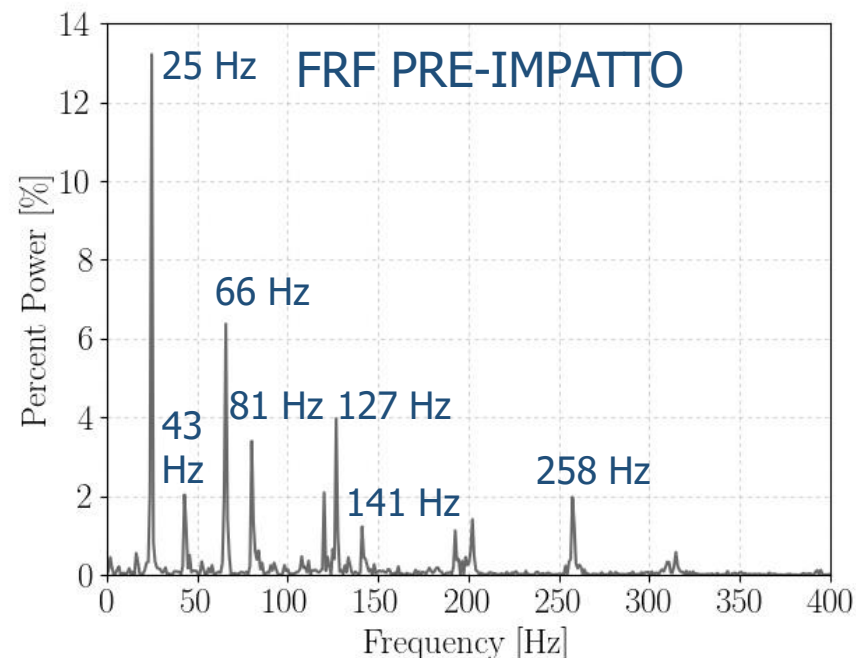
DANNO



Valutazione non distruttiva dello stato di salute

Metodi di analisi globale: analisi vibrazionale di una piastra in composito

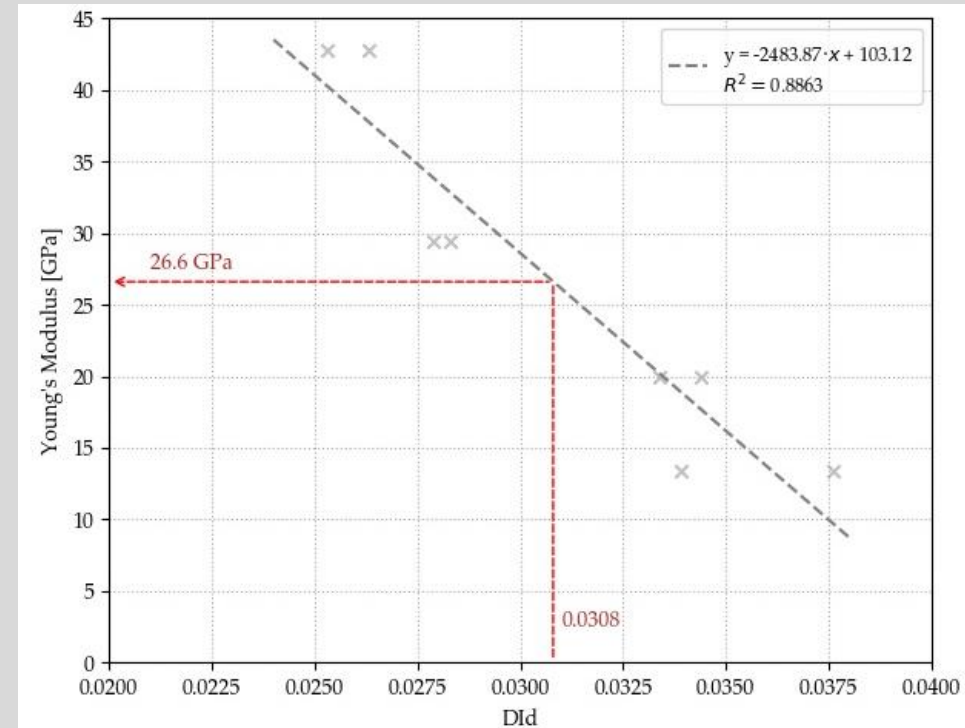
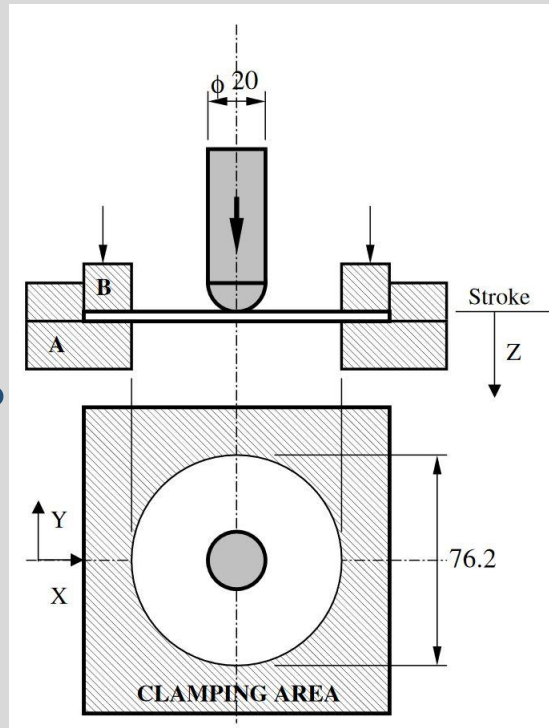
- Analisi vibrazionale (free-free) pre e post impatto a 1.8 J
- Impulse Excitation Technique





Tecnica del Detective Damage Index (DI_d)

- Valutazione locale dello stato di salute
- Campagna di test preliminari per determinare la relazione $E_{res} - DI_d$
 - test di perforazione
 - impatti ad energia crescente
 - test di trazione a 0° , 45° e 90°
- Definizione dell'energia di soglia



G. Belingardi, M. P. Cavatorta, and D. S. Paolino, "A new damage index to monitor the range of the penetration process in thick laminates", *Composites Science and Technology*, vol. 68, no. 13, pp. 2646–2652, 2008.

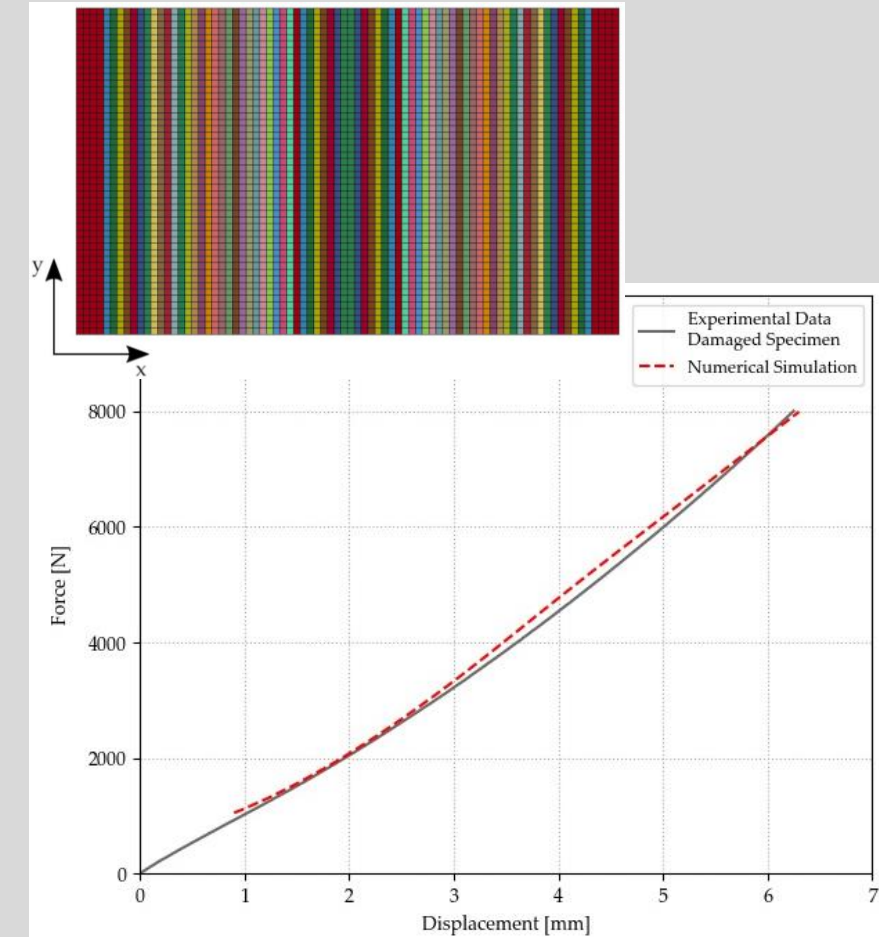
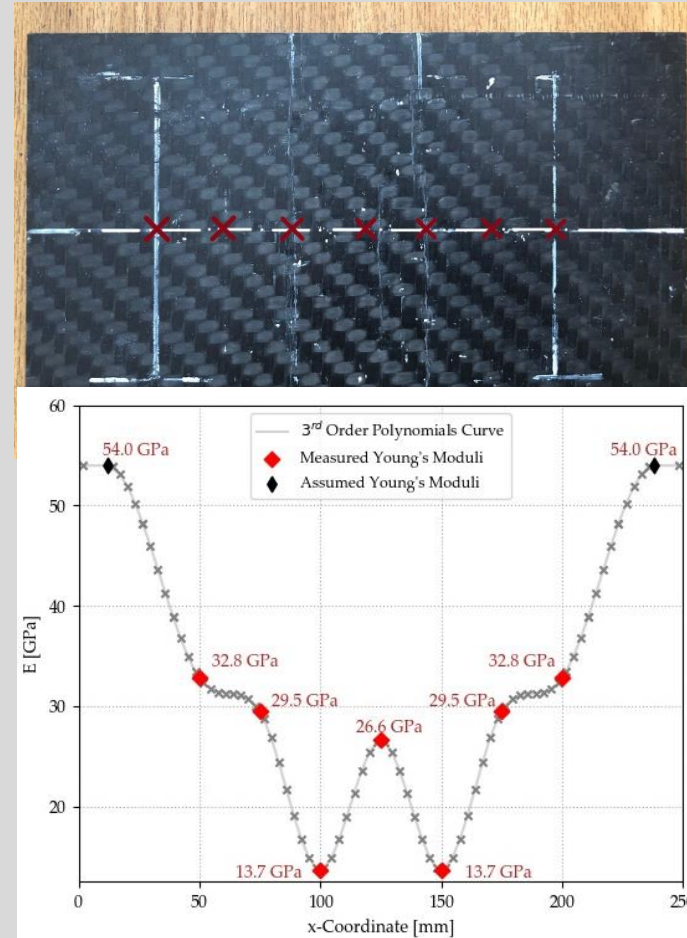
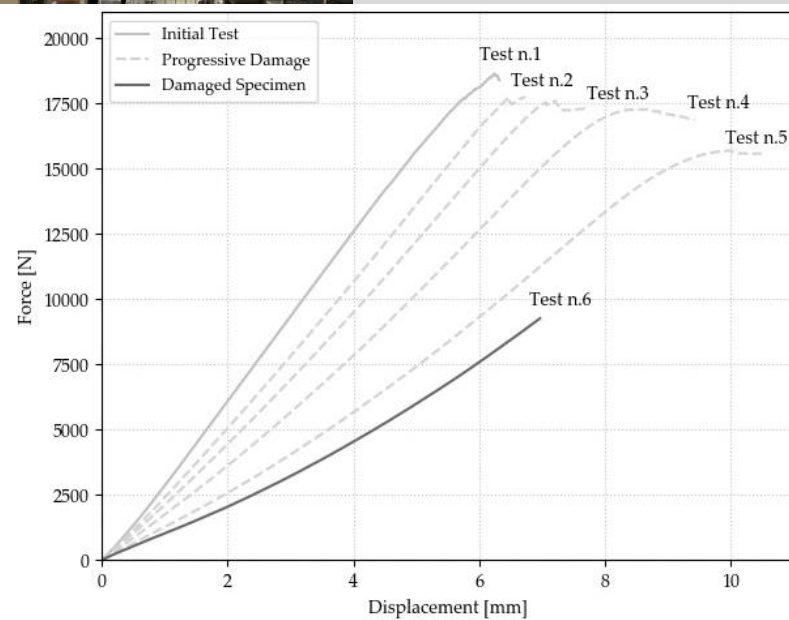
A. Tridello, A. D'Andrea, D. S. Paolino, and G. Belingardi. A novel methodology for the assessment of the residual elastic properties in damaged composite components. *Composite Structures*, 161:435–440, 2017.



VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Tecnica del Detective Damage Index (DI_d)

- 1) Danneggiamento progressivo di piastra in composito con flessione a 4 punti
- 2) DI_d stima proprietà elastiche residue
- 3) Validazione

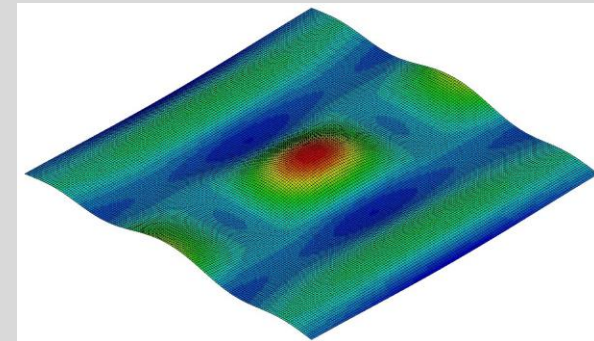
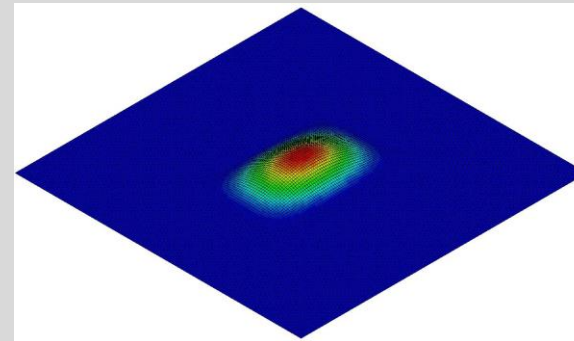
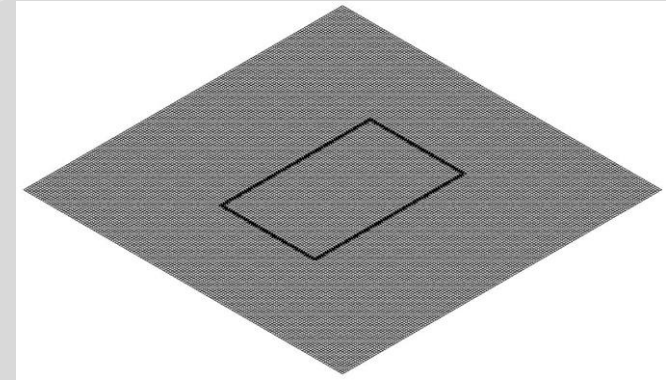
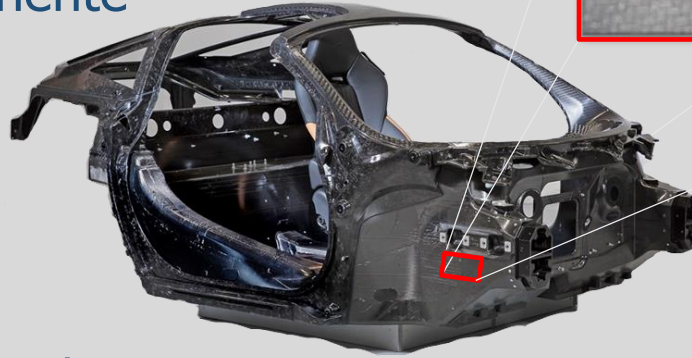


C. Boursier Niutta, A. Tridello, R. Ciardiello, G. Belingardi, and D. S. Paolino. Assessment of residual elastic properties of a damaged composite plate with combined damage index and finite element methods. *Applied Sciences*, 9(12):2579–2592, 2019.



Analisi vibrazionale locale

1. Isolare una regione del componente
2. Misurare la prima frequenza di risonanza della regione considerata (Impulse Excitation Technique)
3. Determinare le proprietà elastiche locali



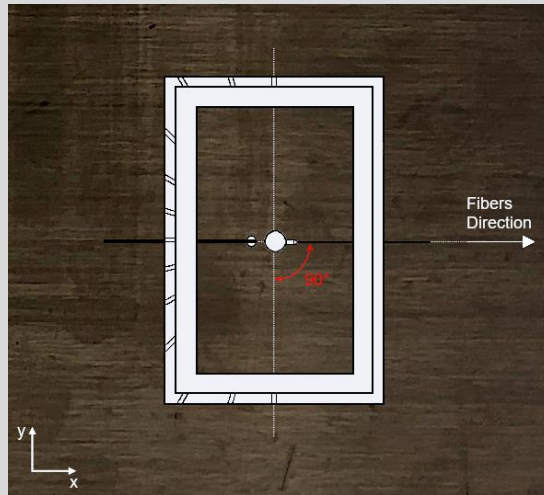
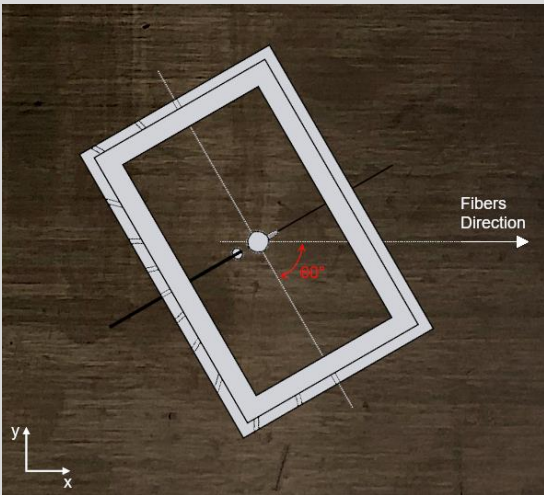
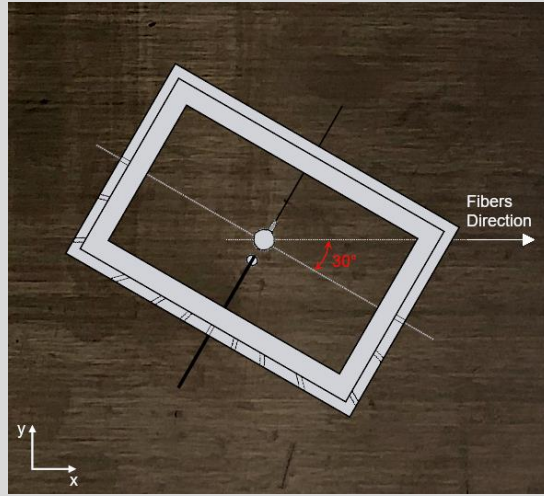
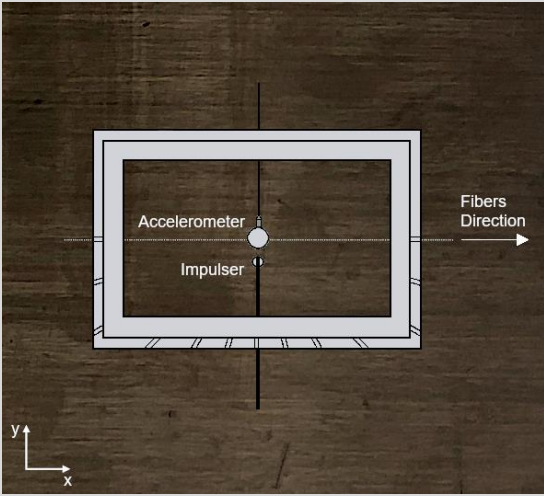


Analisi vibrazionale locale

Molteplici (almeno 4) prove a diversi orientamenti



identificazione delle proprietà elastiche



$\begin{cases} f_{0^\circ} \\ f_{30^\circ} \\ f_{60^\circ} \\ f_{90^\circ} \end{cases}$

$$\min_{[E_{11}, E_{22}, G_{12}, \nu_{12}]} \sum_i \left(\frac{f_{exp,i} - f_{num,i}}{f_{exp,i}} \right)$$

i: orientamento

- Modello numerico:
 - 1) FEM
 - 2) Rayleigh-Ritz

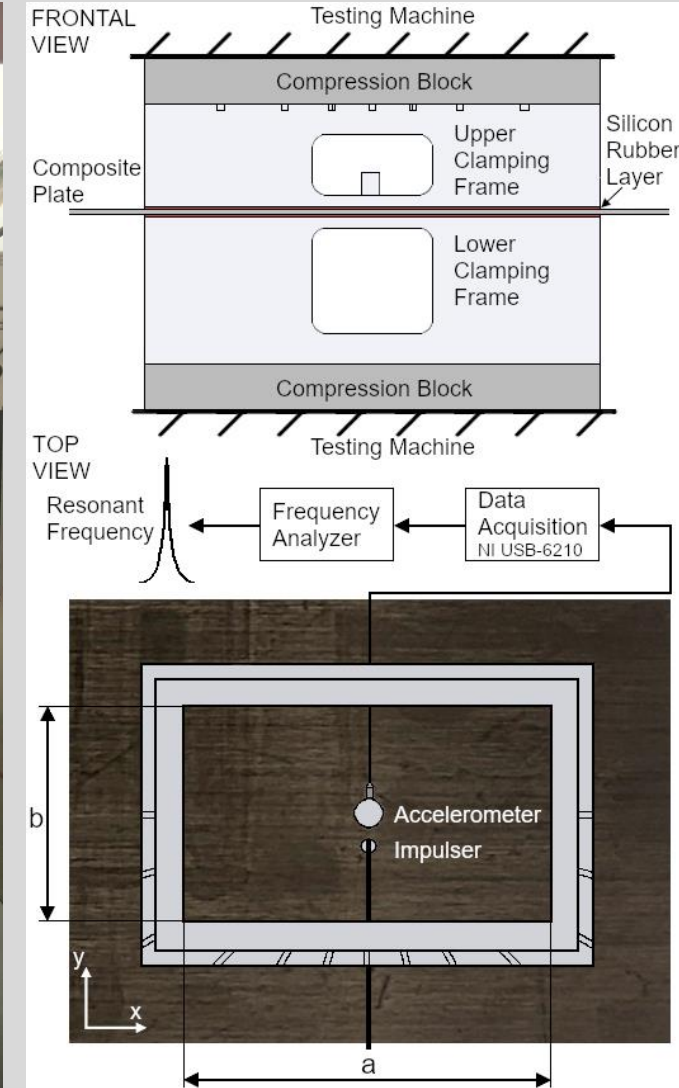
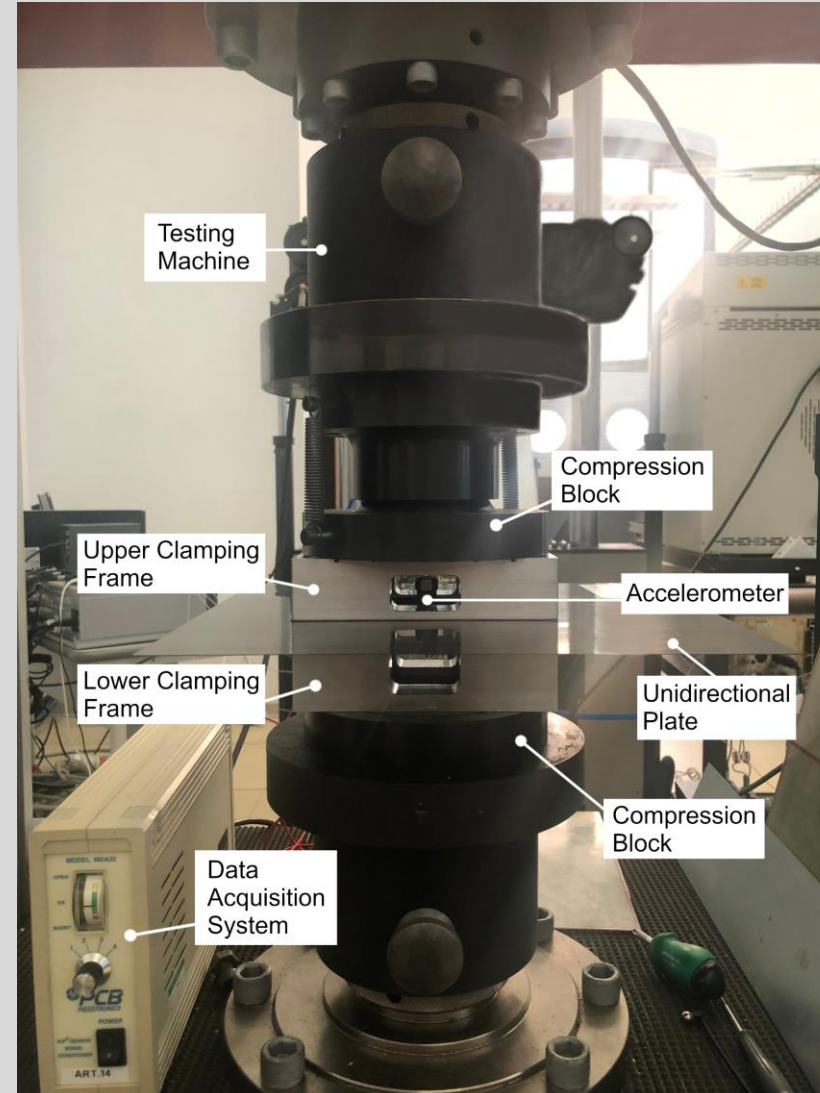


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Analisi vibrazionale locale

Setup sperimentale

- Cornici di forma rettangolare disposte sopra e sotto la piastra in composito ($a=140$ mm, $b=90$ mm)
- Macchina per la compressione delle cornici sulla piastra (1kN)
- Accelerometro per la misura della frequenza di risonanza (massa 15 g)



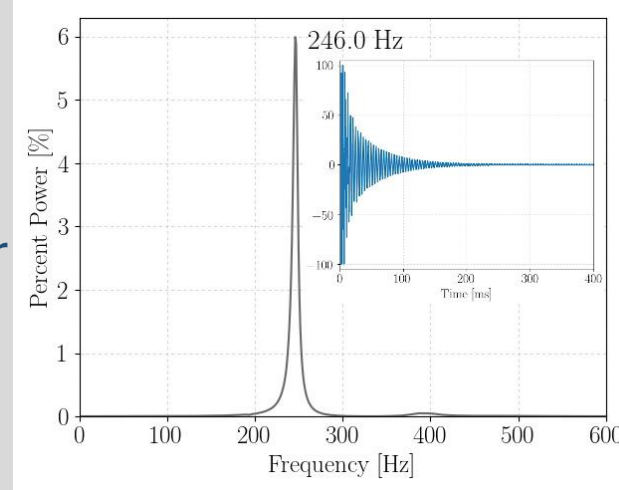
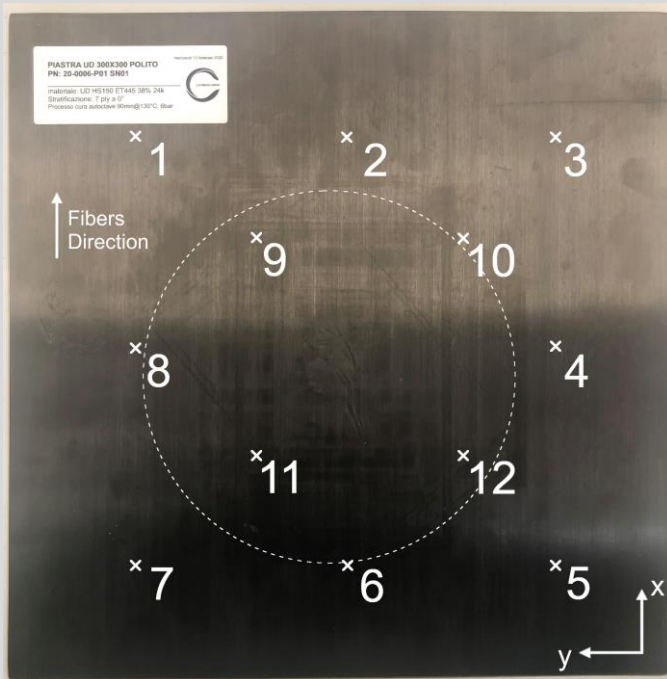


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

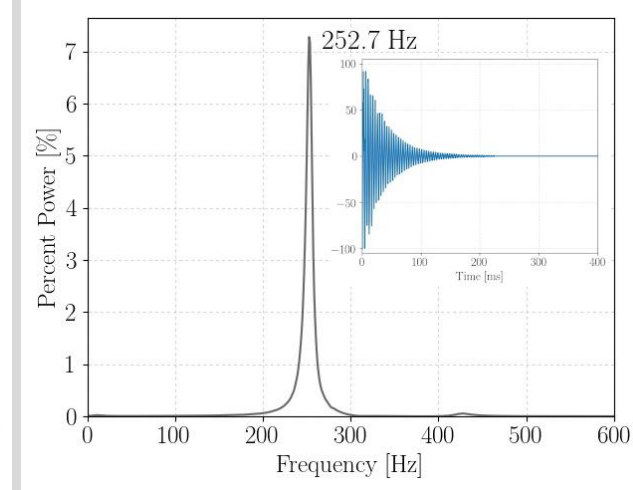
Analisi vibrazionale locale

Validazione sperimentale su piastra unidirezionale

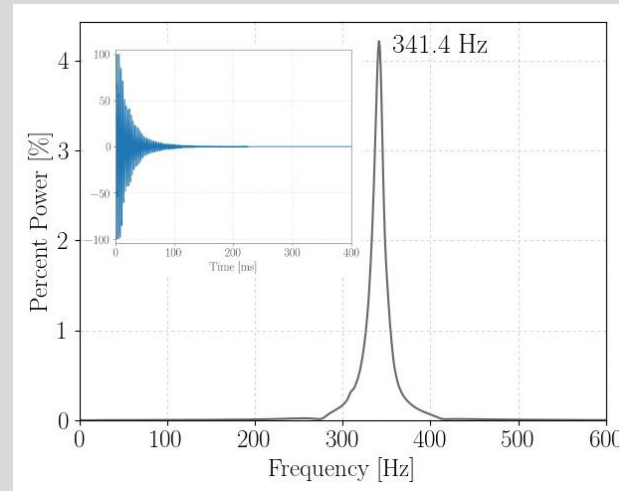
- Matrice epossidica con rinforzo unidirezionale
- Infusione a vuoto e cura in autoclave a 130°C, p=6 bar per 90'
- $E_{11}=131.1$ GPa, $E_{22}=7$ GPa, $G_{12}=3.93$ GPa, $\nu_{12}=0.35$



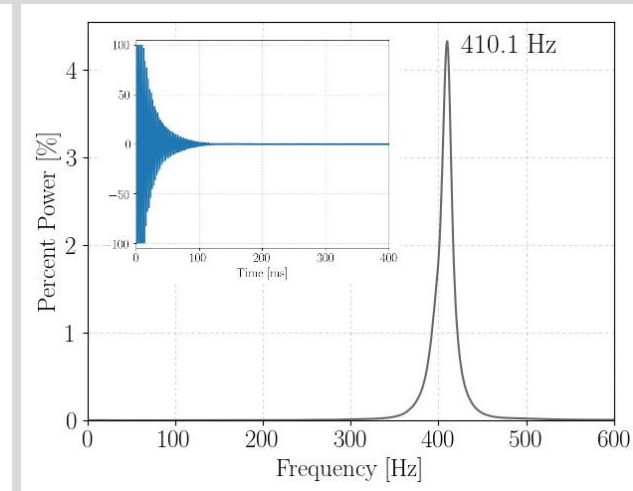
(0°)



(30°)



(60°)



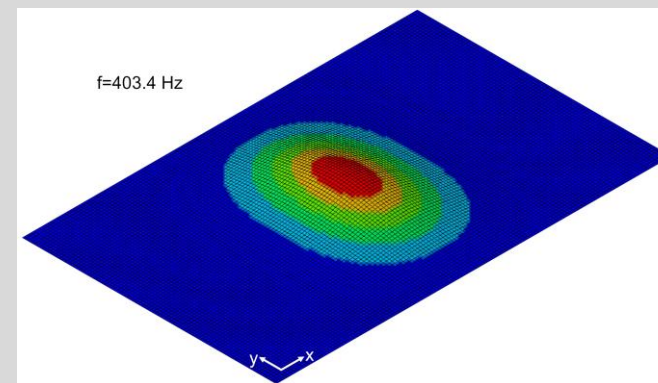
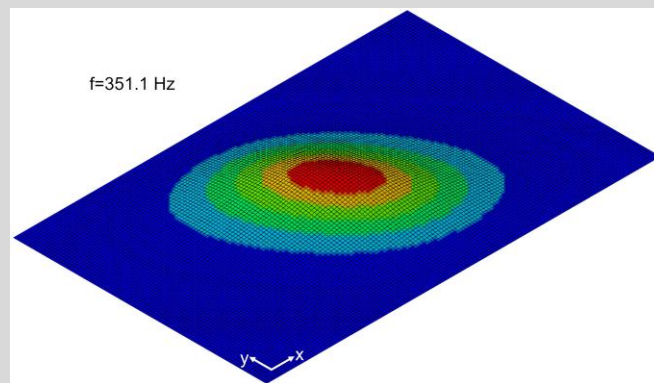
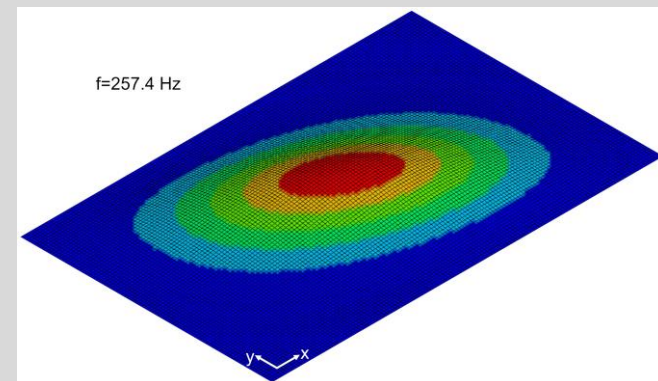
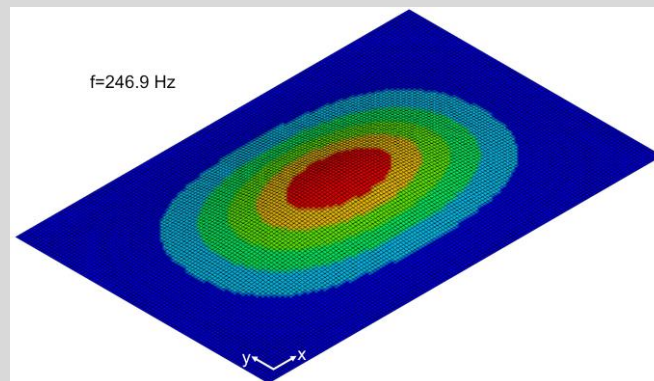
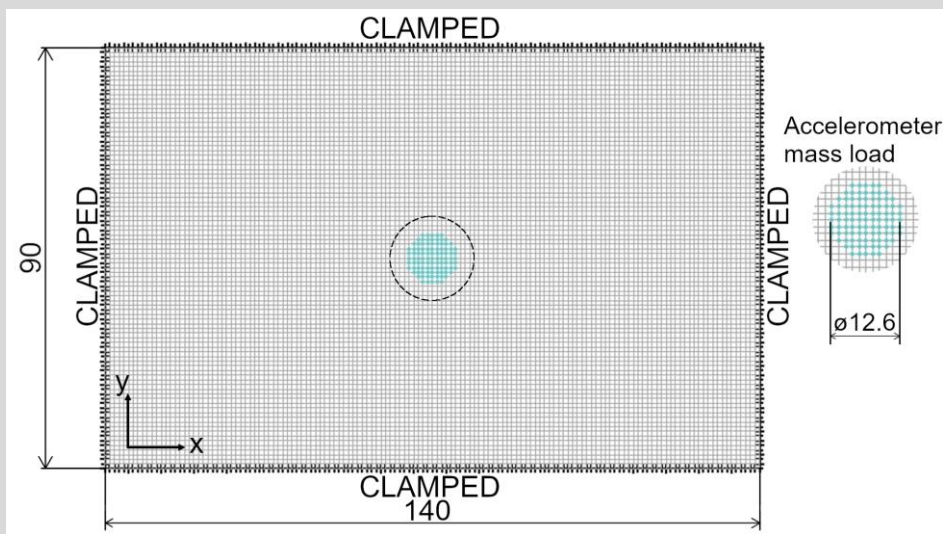
(90°)



VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Analisi vibrazionale locale

Validazione sperimentale su piastra unidirezionale



Proprietà	Valore nominale	Valore locale	Discrepanza
E_{11} [GPa]	131.1	126.0	-3.8%
E_{22} [GPa]	7.0	6.8	-2.9%
G_{12} [GPa]	3.93	3.8	-3.3%
ν_{12} [-]	0.35	0.34	-4%

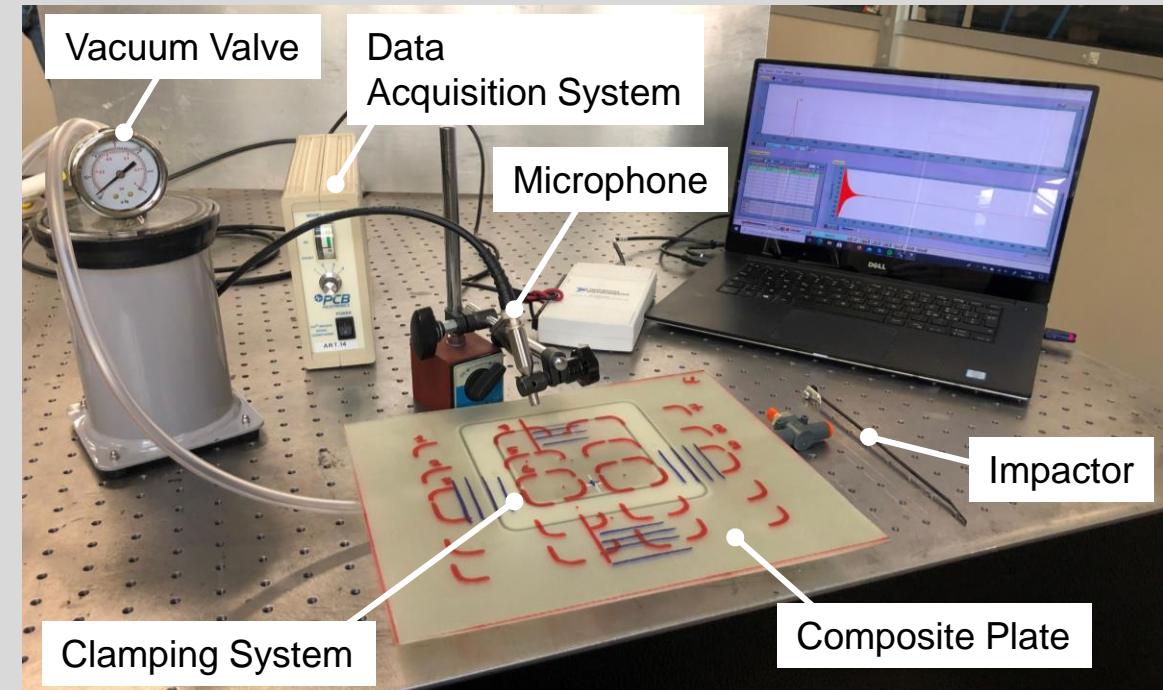
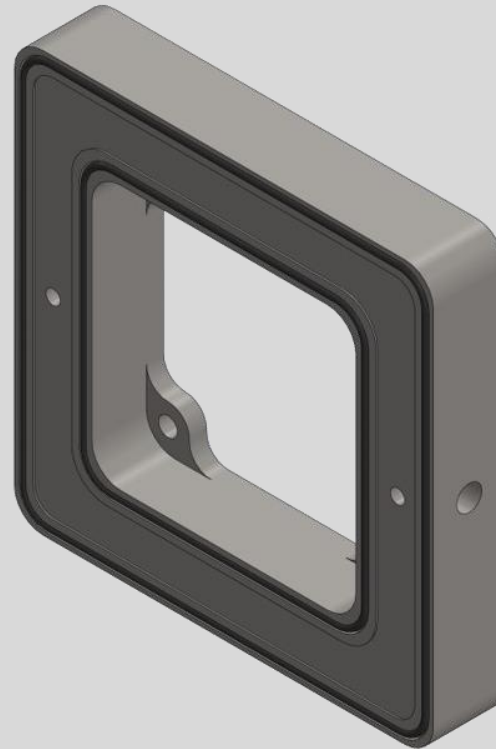
- Test dinamico vs test statico
- Flessione vs trazione
- Variabilità dello spessore
- Rigidezza non infinita dei vincoli



Analisi vibrazionale locale

Setup sperimentale

- Clampaggio da un solo lato della piastra tramite tecnica del vuoto
- Geometria quadrata ($a=100$ mm)
- Misura mediante microfono



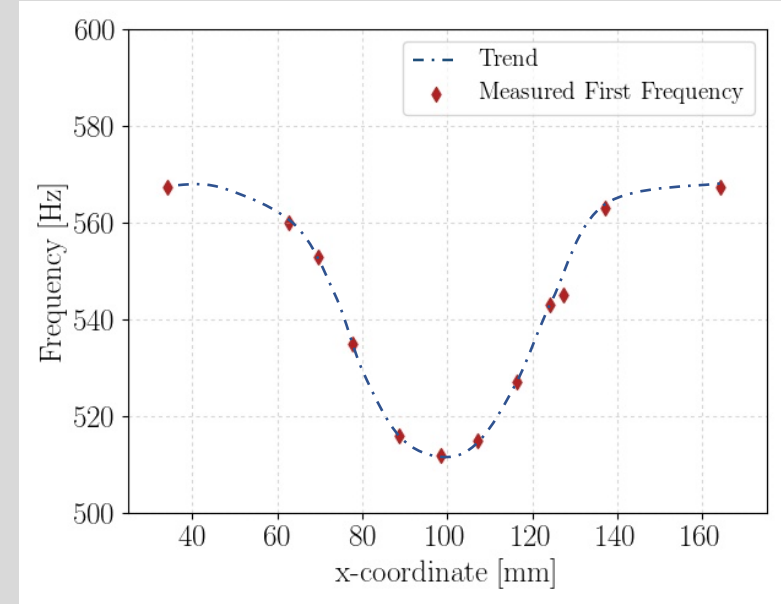
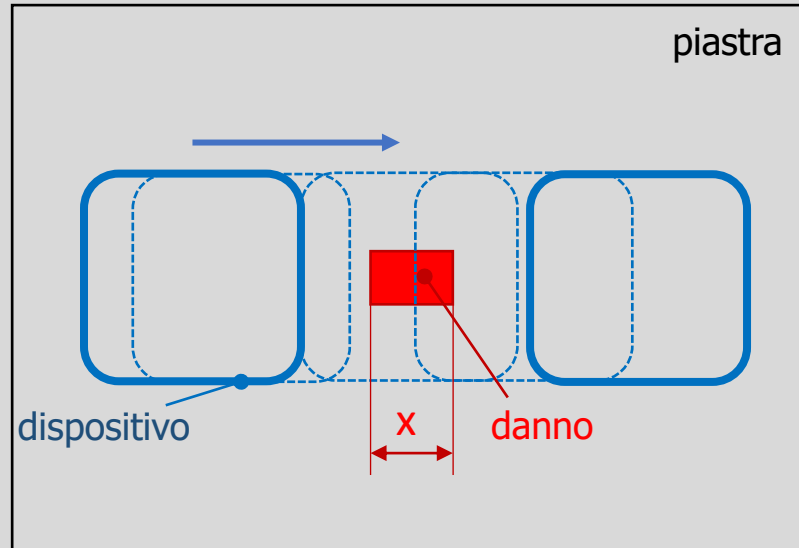


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Analisi vibrazionale locale

Valutazione delle proprietà del danno - metodologia

1. Mappatura della frequenza

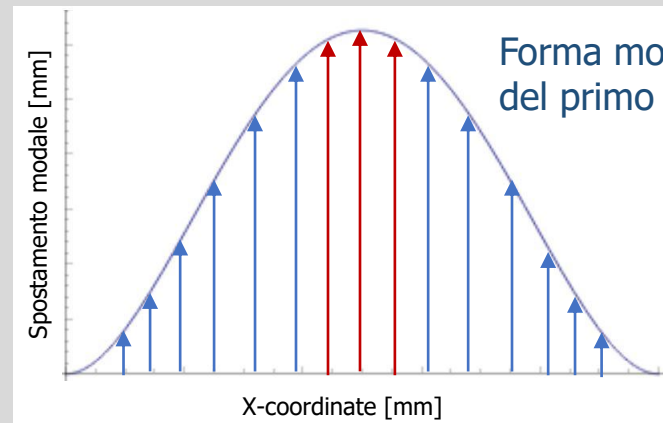


2. Dimensione del difetto (x)

3. Calcolo delle proprietà del difetto

i. $E_{eq} = E_0 \left(\frac{f_d}{f_0} \right)^2$

ii. E_d (media pesata sugli spostamenti modali)



Forma modale del primo modo $w = \left(\frac{x}{a} \right)^2 \left(1 - \frac{x}{a} \right)^2$

$$\sum_i E_i \cdot w_i = E_{eq} \sum_i w_i$$

E_d

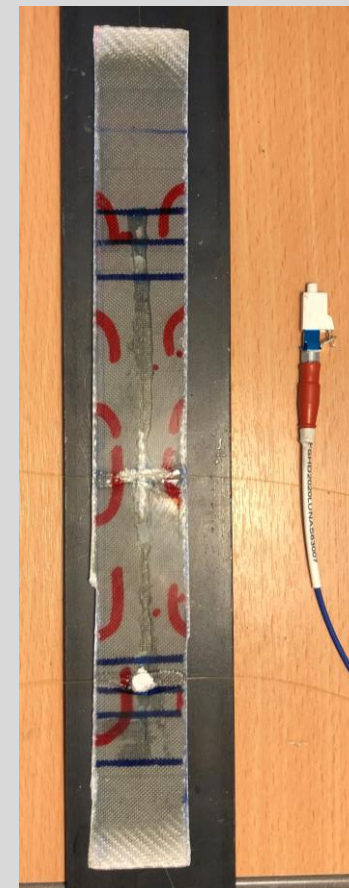
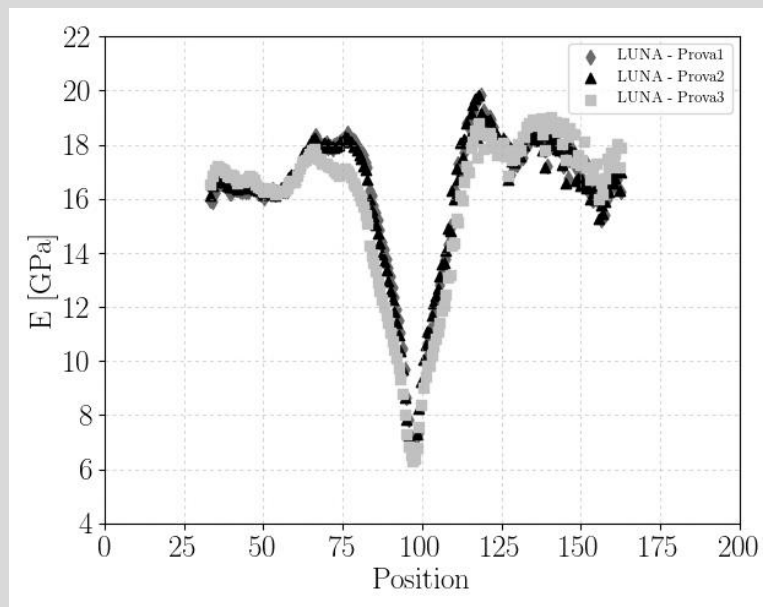
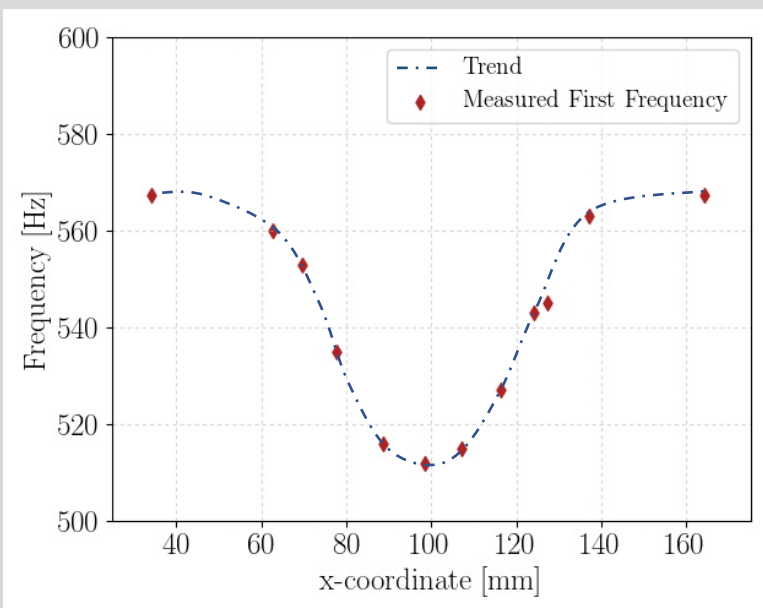


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Analisi vibrazionale locale

Valutazione delle proprietà del danno - metodologia

- Tessuto in fibra di vetro (6 layers) e resina epossidica
- Vacuum bag infusion → curata in forno a 100°C per 3h
- Danno tramite impatto a 1.8 J
- Confronto con LUNA (fibra ottica)



Metodo	Eeq [GPa]	X difetto [mm]	Ed [GPa]
Analisi Vibrazionale	13.64	33.7	11.43
Fibra Ottica	14.97	42	6.5

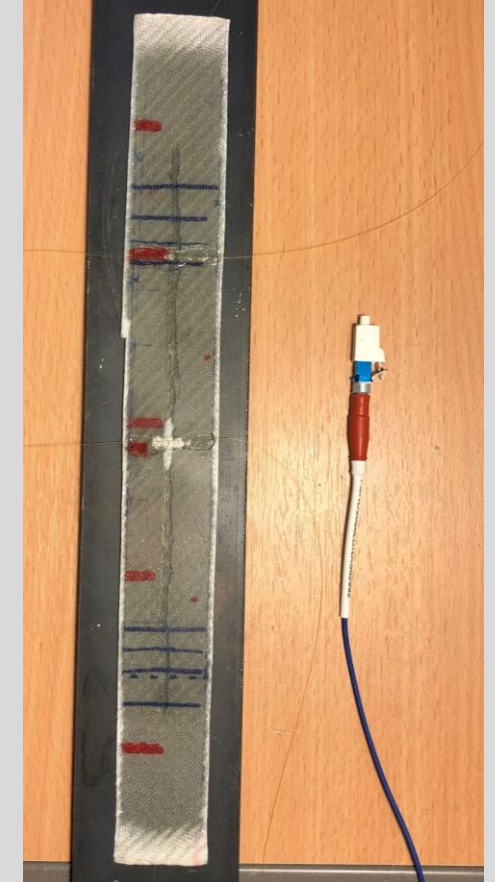
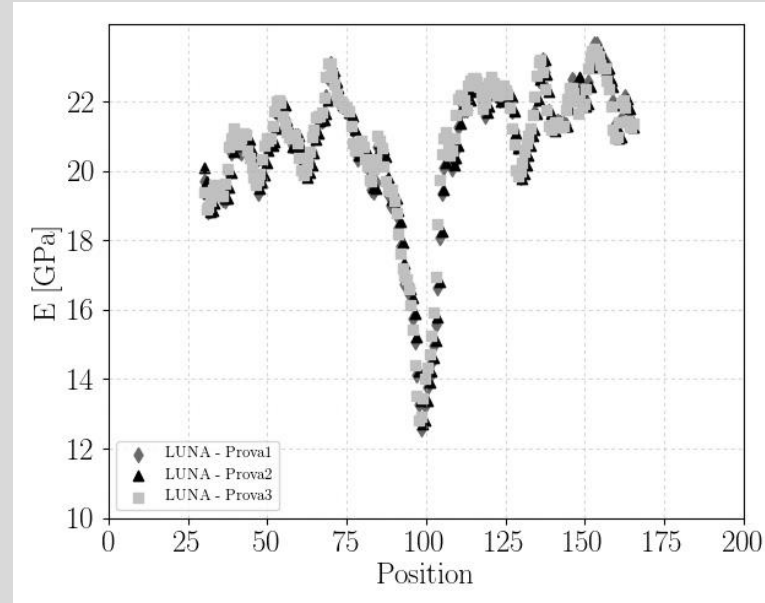
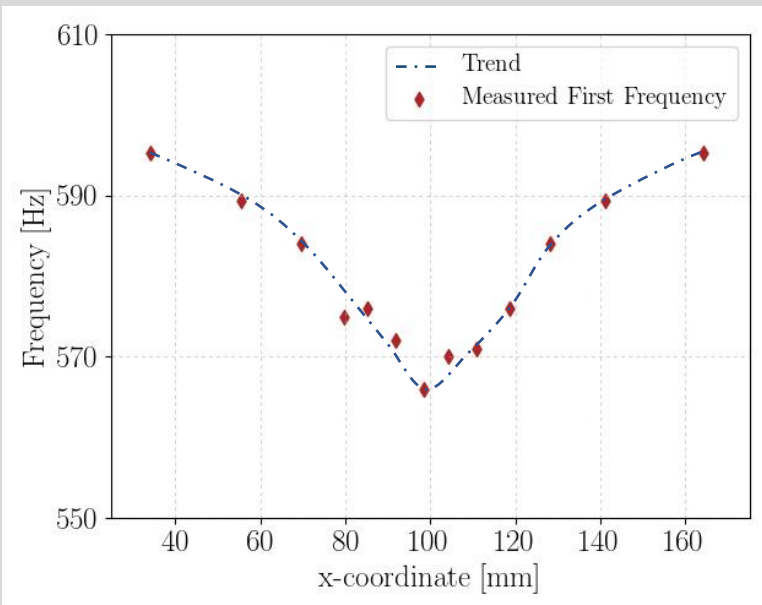


VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

Analisi vibrazionale locale

Valutazione delle proprietà del danno - metodologia

- Tessuto in fibra di vetro (8 layers) e resina epossidica
- Vacuum bag infusion → curata in forno a 100°C per 3h
- Danno tramite impatto a 1.8 J
- Confronto con LUNA (fibra ottica)



Metodo	Eeq [GPa]	X difetto [mm]	Ed [GPa]
Analisi Vibrazionale	19.3	26.0	16.2
Fibra Ottica	20.2	28.0	12.5



Conclusioni

- L'attrezzatura sperimentale sviluppata è in grado di isolare la risposta vibrazionale di una regione di interesse in laminati in composito
- L'attrezzatura sperimentale è in grado di valutare la presenza di difetti (esistenza), la loro posizione nel componente (locazione) e le proprietà elastiche residue (severità)
- E' stata sottoposta domanda di brevetto per l'attrezzatura sperimentale
- Lavori futuri si concentreranno sulla caratterizzazione di diverse tipologie di difetto. Inoltre, sono necessarie valutazioni sulla vita residua (prognosi), note le caratteristiche del difetto, al fine di identificare una corretta strategia di manutenzione



VALUTAZIONE NON DISTRUTTIVA, LOCALE E QUANTITATIVA DELLE PROPRIETÀ ELASTICHE
RESIDUE DEI COMPOSITI LAMINATI

GRAZIE PER LA VOSTRA ATTENZIONE!

Carlo BOURSIER NIUTTA
carlo.boursier@polito.it